



## PROTECCIÓN ACÚSTICA DE MAMPARAS: EVALUACIÓN E ÍNDICES DE PROTECCIÓN

REFERENCIAS PACs: 43.20Dk 43.20.Fn 43.55 Dt 43.55 Ev.

J. Pfretzschner, R.M<sup>a</sup>. Rodríguez, F. Simón, C. De la Colina, A. Moreno  
Instituto de Acústica (CSIC)  
Serrano 144  
28006 Madrid

### ABSTRACT

It is wide spread the use of screens in large landscape offices. In general, the installation of these screens is addressed to provide a certain visual privacy among workers, but most of the times, their acoustical protection is supposed but not accredited.

This paper shows a method to predict the acoustical protection of indoor screens considering all the magnitudes that must be taken into account: geometrical dimensions and acoustical properties of the screen, together with the volume and acoustical treatment of the room. Theoretical and experimental data are compared.

A single number rating index to characterise the attenuation provided by indoors screens, employing the human voice normalised spectrum, is also proposed.

### INTRODUCCIÓN

El uso de mamparas de compartimentación parcial en oficinas paisajistas y en talleres está ampliamente difundida con objeto de crear tanto una cierta privacidad como una protección a los niveles sonoros de fuentes acústicas con diversos orígenes. Usualmente los catálogos solo muestran sus características acústicas intrínsecas: absorción acústica y algunas veces su aislamiento a ruido aéreo, quedando por determinar su capacidad de protección por efectos de difracción en sus bordes perimetrales, efecto de primordial importancia cuando se trata de proteger acústicamente dos puestos contiguos de trabajo, tanto en una oficina como en un taller.

Consultadas las normas al uso [1, 2], se comprueba que la norma ISO se centra en la medida de las pérdidas por inserción en condiciones de campo libre, condiciones muy lejos de la utilización real, como se verá en el desarrollo del presente trabajo. Por otra parte, la norma VDI establece una predicción teórica que según nuestras comprobaciones experimentales se aleja mucho de los datos encontrados, obteniéndose resultados mas acordes con los experimentales si se utiliza el método descrito en el desarrollo de un ejemplo incluido en la norma, que tiene el grave inconveniente de hacer un tratamiento de recinto bidimensional, lo que se aleja mucho de la realidad en una gran mayoría de casos.

Ante esta situación, hemos creído conveniente desarrollar un procedimiento alternativo que permita predecir la capacidad de protección de una pantalla acústica situada en un recinto conocido, con suficiente grado de aproximación, para su posterior utilización en cálculos de predicción de acondicionamiento acústico de locales.

A lo largo de este trabajo se exponen las consideraciones a tener en cuenta en los cálculos de previsión de esta magnitud, ya que además de sus dimensiones geométricas y características acústicas de la pantalla, el resultado depende del entorno que la rodea (volúmenes y características acústicas del recinto).



Así mismo, se propone caracterizar la atenuación de la pantalla instalada mediante un índice de número único, que dependerá del tipo de señal empleada. En este trabajo nos centraremos en oficinas, por lo que la señal a utilizar corresponderá a un espectro normalizado de la voz humana [3], ya que esta señal es la que predomina en estos locales. La norma ISO10053 1991, propone para este fin el promediado aritmético o bien la evaluación  $L_w$ .

## ASPECTOS TEÓRICOS

Las formulaciones de las pérdidas de inserción,  $IL$ , de una pantalla acústica se establecen para condiciones de campo acústico libre, condiciones que pierden su validez cuando ésta se instala en el interior de un recinto, debidas a las reflexiones en sus superficies límites o en los objetos situados en sus cercanías.

En los cálculos que se exponen a continuación, se trata el problema de forma energética a partir de las presiones cuadráticas en el punto de recepción como suma de las correspondientes presiones cuadráticas del campo reverberante más las difractadas por los bordes de la barrera.

El procedimiento debe considerarse como un método de ingeniería, cuya justificación reside en el carácter mas o menos aleatorio de las señales a emplear así como su tratamiento conjunto en bandas de octava o tercio de octava. El grado de incertidumbre asociado es suficientemente reducido para obtener una correlación aceptable entre los cálculos predictivos y los ensayos in - situ.

De acuerdo con Embleton [4] la presión cuadrática media en el punto de observación antes de interponer la pantalla o mampara se puede expresar aproximadamente por:

$$|p_0|^2 = rcW \left\{ \frac{Q}{4pr^2} + \frac{4}{S_0 a_0} \right\} \quad (1)$$

siendo:  $rc$  la impedancia acústica del aire;  $W$  la potencia acústica de la fuente;  $Q$  el factor de directividad,  $r$  la distancia emisor - receptor;  $a_0$  el coeficiente de absorción acústica medio del local y  $S_0$  la superficie total del recinto.

Después de insertar la pantalla, la presión cuadrática en el lugar de recepción será:

$$|p|^2 = |p_r|^2 + |p_d|^2 \quad (2)$$

correspondiendo el primer sumando a la presión cuadrática en campo difuso y el segundo a la difractada por los bordes de la pantalla.

### Presión cuadrática debida al campo difuso

Antes de instalar la pantalla se calculará la presión cuadrática debida al campo difuso considerando que la pantalla divide al recinto original en dos subrecintos. Éstos están acoplados por la energía reverberante que pasa sobre y alrededor del perímetro de la pantalla.

Suponiendo que la fuente acústica radia con una potencia constante,  $W$ , el balance energético en el interior del subrecinto emisor es:

$$W - W_1 - W_2 + W_3 = 0 \quad (3)$$



siendo  $W_1$  la potencia absorbida en el subrecinto emisor,  $W_2$  la reflejada desde el subrecinto emisor al receptor y  $W_3$  la reflejada desde el subrecinto receptor al emisor.

La teoría de la difusión en recintos, permite relacionar las presiones cuadráticas con las potencias reflejadas y disipadas a través de las expresiones:

$$W_1 = |p_1|^2 \frac{S_1 a_1}{4 r c} \quad (3a) \quad W_2 = |p_1|^2 \frac{S}{4 r c} \quad (3b) \quad W_3 = |p_2|^2 \frac{S}{4 r c} \quad (3c)$$

correspondiendo los subíndices 1 a la presión, coeficiente de absorción medio y área superficial del subrecinto emisor, y 2 la del receptor.  $S$  corresponde al área de apertura limitada por el perímetro de la pantalla y las paredes y techo del recinto en su sección.

Sustituyendo estas expresiones en la ec(3):

$$4 r c W = |p_1|^2 (S_1 a_1 + S) - |p_2|^2 S \quad (4)$$

Similarmente, el balance energético para el subrecinto receptor requiere que:

$$W_4 + W_3 - W_2 = 0 \quad (5)$$

siendo  $W_4$  la potencia absorbida en el subrecinto receptor, que de acuerdo con la teoría de la difusión en recintos:

$$W_4 = |p_2|^2 \frac{S_2 a_2}{4 r c} \quad (5a)$$

ecuación análoga a la (3a). Sustituyendo (5a), (3b), y (3c) en la ec(5), se tiene:

$$|p_1|^2 = |p_2|^2 \frac{S_2 a_2 + S}{S} \quad (6)$$

ecuación que relaciona las presiones cuadráticas en ambos subrecintos.

Sustituyendo la ec. (6) en la ec.(4):

$$|p_2|^2 = 4 r c W \frac{K_1 K_2}{S(1 - K_1 K_2)} \quad (7) \quad \text{con} \quad K_1 = \frac{S}{S_1 a_1 + S} \quad (7a) \quad \text{y} \quad K_2 = \frac{S}{S_2 a_2 + S} \quad (7b)$$

que corresponde a la presión cuadrática media del campo difuso actuante sobre el receptor.

### **Presión cuadrática debida a la difracción por los bordes de la pantalla**

Puede utilizarse cualquiera de los algoritmos establecidos para pantalla seminfinita. Por su mayor simplicidad se utiliza la conocida expresión de Tatge que relaciona las presiones cuadráticas en campo libre (en ausencia de la pantalla) y la difractada por su borde superior:

$$\frac{|p_d|^2}{|p_f|^2} = \frac{1}{3 + 20 N} \quad (8)$$

siendo la presión cuadrática en campo libre, antes de insertar la pantalla:

$$|p_f|^2 = r c \frac{WQ}{4pr^2} \quad (8a)$$

siendo  $Q$  el factor de directividad ( $=1$  para fuente puntual sobre el terreno).

En el caso que se consideren las difracciones sobre tres bordes de la pantalla:

$$|p_d|^2 = |p_f|^2 \left\{ \frac{1}{3 + 20 N_1} + \frac{1}{3 + 20 N_2} + \frac{1}{3 + 20 N_3} \right\} \quad (9)$$

siendo  $N_i$  los correspondientes números de Fresnel de acuerdo a cada uno de los bordes considerados.

En general, la presión cuadrática media difractada por la pantalla en condiciones de campo libre puede escribirse:

$$|p_d|^2 = r c \frac{WQD}{4pr^2} \quad (10)$$

en la que  $D$  puede tratarse como un coeficiente de difracción al relacionar el cociente de las presiones difractada e incidente. (Nótese que  $IL = 10 \log(D)$  dB siendo  $D = \sum_i 1/(3 + 20 N_i)$  ).

La presión cuadrática total en el receptor vendrá dada por la suma de las ec. 7 y 10:

$$|p^2| = 4 r c W \frac{K_1 K_2}{S(1 - K_1 K_2)} + r c \frac{WQD}{4pr^2} \quad (11)$$

La potencia acústica radiada por la fuente puede calcularse a través de la expresión para campo libre:

$$W = \frac{4pr^2 |p_f|^2}{r c Q}$$

### **Pérdidas por inserción en un recinto semirreverberante**

Se obtienen por definición de la relación entre las ec.(11) y (1):

$$IL = 10 \log \left\{ \frac{\frac{QD}{4pr^2} + \frac{4 K_1 K_2}{S(1 - K_1 K_2)}}{\frac{Q}{4pr^2} + \frac{4}{S_0 a_0}} \right\} \quad (12)$$

ecuación cuyo numerador está compuesto por un sumando correspondiente a la difracción de la pantalla en campo libre y otro correspondiente (proporcional) a la presión cuadrática del campo difuso actuante sobre el receptor. Ambos términos se normalizan a unos términos proporcionales a la presión cuadrática en campo libre y al campo reverberante en el receptor, en ausencia de la pantalla.

Llamando  $T1 = QD/4\pi r^2$ ;  $T2 = 4K_1 K_2 / S(1 - K_1 K_2)$ ;  $T3 = Q/4\pi r^2$  y  $T4 = 4/S_0 \alpha$ , se tiene que el término  $10 \log(T1/T3)$  representa las IL de una pantalla semiinfinita en campo libre;

$10 \log(T1/T3 + T4)$  corresponde a la contribución de la difracción en el campo semirreverberante;

$10 \log((T2/T3 + T4))$  correspondería a la presión cuadrática media del campo difuso en el receptor normalizada a la del campo reverberante en ausencia de la pantalla.



## ÍNDICE DESCRIPTOR DE LAS CARACTERÍSTICAS DE PROTECCIÓN ACÚSTICA DE UNA MAMPARA

La atenuación, o protección que la ec. (12) proporciona, además de depender de las características acústicas de la pantalla, del local en que se ubica y de las posiciones relativas de la fuente y del receptor, también es función de la frecuencia. Hasta el momento no existe una norma que aconseje o recomiende disposiciones concretas para la medida así como recintos especiales.

A lo largo de los distintos desarrollos puede observarse la gran influencia de todos los parámetros indicados; sin embargo, no representaría dificultad alguna establecer para la medida una sala normalizada con dimensiones acotadas así como un tiempo de reverberación medio de 0.5 s. Las posiciones del emisor y receptor pueden definirse sin dificultad alguna de forma que sean representativas de dos personas sentadas en sus puestos de trabajo a ambos lados de una mampara.

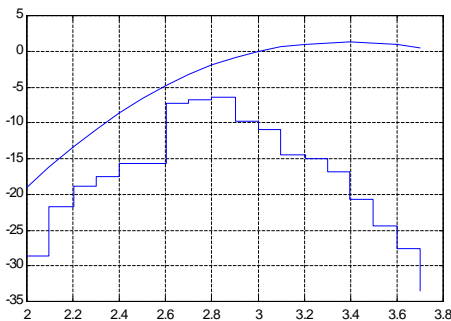


Figura 1. Espectro medio de la palabra y curva sonométrica A.

Por último para independizar el índice de la frecuencia de emisión de la fuente, se propone utilizar un espectro normalizado de voz. A estos efectos, la figura 1 presenta un espectro normalizado en dBA (en bandas de tercio de octava), realizado a partir del propuesto por Tarnóczy [3] como espectro medio de la palabra de lenguajes europeos (mujeres y hombres) cuya evolución es muy parecida a los utilizados normalmente. En la figura se presenta así mismo la curva sonométrica A, a efectos comparativos.

Bajo estas condiciones, el índice de pérdidas de una pantalla situada en un campo reverberante puede expresarse como:

$$IP = -10 \log \sum_i 10^{0.1(E_{Pi} + A_i - IL_i)} \quad (13)$$

dado que el espectro se ha elegido de forma que:  $-10 \log \sum_i 10^{0.1(E_{Pi} + A_i)} = 0$ , donde  $E_{Pi}$  son los distintos niveles de la palabra,  $A_i$  la curva de ponderación A y  $IL_i$  las pérdidas de inserción, todos ellos referidos a las frecuencias centrales de las correspondientes bandas de tercio de octava entre 100 Hz y 5000 Hz.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se han ensayado en laboratorio las protecciones acústicas de mamparas en distintas condiciones de absorción en el recinto, con objeto de comprobar el grado de aproximación de las formulaciones teóricas propuestas.

Para ello se ha empleado una de las cámaras de transmisión horizontal del Instituto de Acústica, cuyas dimensiones son  $4.8 \times 5.97 \times 3.17 \text{ m}^3$  y cuyos tiempos de reverberación en vacío oscilan entre 7.4 s, para la frecuencia de 100 Hz hasta 1.3 s para la de 5000 Hz.

Para la experimentación se empleó en primer lugar una mampara de  $1.6 \times 2.4 \text{ m}^2$ , compuesta por dos módulos de  $1.6 \times 1.2 \text{ m}^2$  cada uno, situada perpendicularmente a una de las paredes longitudinales de la cámara, según su plano central, y con uno de sus bordes pegado a una pared. En la figura 2a, se representa los coeficientes de absorción, medido en cámara reverberante, de la mampara. En la figura 2b se presentan los resultados experimentales (- -) de pérdidas de inserción para las condiciones expuestas anteriormente. Las tres curvas corresponden a registros de 32 s de duración de una excitación con ruido blanco para las posiciones de emisor y receptor que muestra la tabla I.



Tabla I

| Posiciones | hs (m) | hr (m) | S (m) | R (m) |
|------------|--------|--------|-------|-------|
| 1ª         | 1.2    | 1.3    | 1.5   | 1.5   |
| 2ª         | 1.2    | 1.3    | 1.0   | 1.1   |
| 3ª         | 1.0    | 1.1    | 1.0   | 1.1   |

Tabla I.-  $h_s$  y  $h_r$ , son alturas de altavoz y micrófono respectivamente.  $S$  y  $R$ , son las distancias horizontales a la mampara.

Sobre las curvas experimentales, se ha superpuesto la curva media calculada para las tres posiciones según la ecuación (12). Así mismo, a efectos de comparación, en la parte superior de la figura 2b, se representan las pérdidas de inserción de una pantalla semiinfinita con la misma altura, para las tres posiciones y en condiciones de campo libre.

Dada la escasa absorción de la mampara y la alta reverberación del recinto, se comprueba su pequeño valor de protección

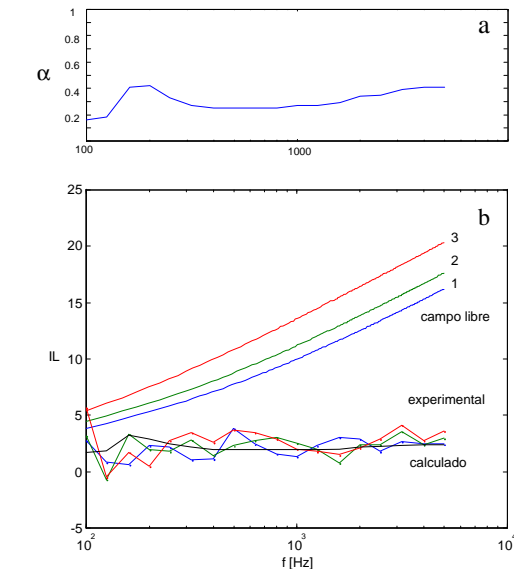


Figura 2.- 2a) Coeficiente de absorción de los paneles divisorios. 2b) IL para tres posiciones de emisor y receptor. Datos experimentales (—) y teóricos (—) comparados con las IL en campo libre.

en función de la frecuencia, lo que indica una preponderancia del campo reverberante sobre el difractado por la pantalla.

Una variación de las posiciones relativas del emisor y receptor respecto del borde difractor, que en condiciones de campo libre significarían variaciones de mas de 3 dB, aquí solo se traducen en variaciones experimentales menores de 1 dB (teóricamente inferiores a 0.2 dB), como se aprecia en la figura (2b). Se encuentra buena concordancia entre los resultados teóricos y experimentales.

Para las situaciones consideradas según las tres posiciones de la Tabla 1, se obtienen unos índices de protección de:

$$IP(1) = 2.8 \text{ dBA}$$

$$IP(2) = 2.9 \text{ dBA}$$

$$IP(3) = 2.8 \text{ dBA}$$

Según la ecuación (12), en la expresión de las pérdidas por inserción  $IL$ , aparece la contribución del campo reverberante en el interior del recinto, junto con la influencia de las dimensiones físicas de la pantalla sobre los efectos de difracción. Con objeto de poner de manifiesto la influencia de las diferentes contribuciones, se han realizado un conjunto de experiencias cuyos resultados se presentan en las figuras 3a y 3b. En primer lugar se ha modificado la reverberación del recinto introduciendo 24.4 m² de absorción equivalente. Idealmente esto se conseguiría instalando un techo acústico de características adecuadas, sin embargo en este caso y por

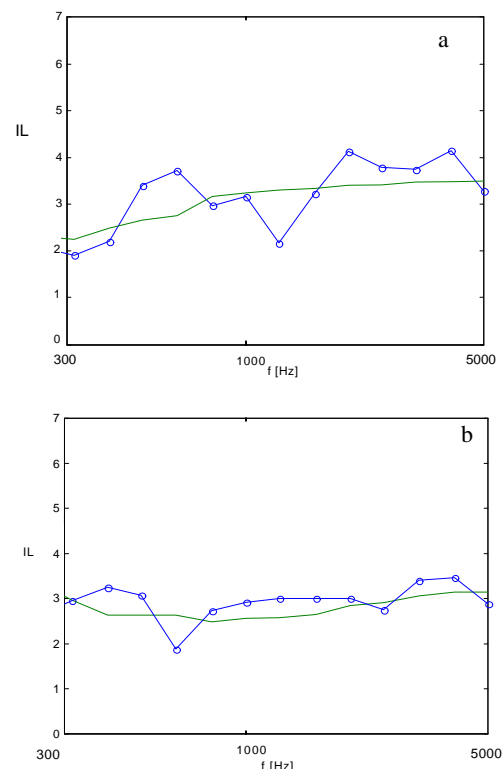


Figura 3.- 3a) Valores teóricos (—) y experimentales (— o —) de IL de una pantalla acústica de 2.4 m de longitud en recinto absorbente

3b) Valores teóricos (—) y experimentales (— o —) de IL de una pantalla acústica de 3.6 m de longitud en un recinto reverberante

facilidades de montaje, se ha resuelto disponiendo en el suelo  $29 \text{ m}^2$  de paneles de lana mineral de  $6 \text{ cm}$  de espesor.

La figura 3a corresponde al promedio de los resultados para las tres configuraciones de la tabla I, En este caso se ha mantenido la mampara compuesta de dos módulos añadiéndose el recubrimiento de lana mineral en el suelo. Sobre la curva se ha superpuesto la evaluación teórica correspondiente a esta situación.

En la figura 3b, las condiciones de reverberación del recinto son las iniciales (recinto vacío), modificándose las dimensiones de la mampara por adición de un módulo más, dando como resultado una longitud total de  $3.6 \text{ m}$ . Si bien las  $IL$  para ambas situaciones presentan resultados numéricamente comparables, en el caso de la figura 3a se aprecia que las pérdidas de inserción presentan una tendencia ascendente de  $2\text{dB/década}$  a medida que aumenta la frecuencia, como correspondería a recintos con un tiempo de reverberación menor (en el caso ideal de campo libre la pendiente es de  $6\text{dB/década}$ ). Se debe advertir no obstante, que la actuación correspondiente al primer caso (incremento de la absorción acústica del recinto), produce una impresión subjetiva de mayor confort acústico.

El índice global para las situaciones estudiadas oscila entorno a  $3 \text{ dBA}$ , mientras que las mismas mamparas en condiciones de campo libre y teniendo en cuenta dos difracciones por los bordes y las reflexiones en el suelo, alcanzarían valores de índices globales de protección, entre  $6$  y  $9 \text{ dBA}$ .

## CONCLUSIONES

Los biombos separadores en oficinas diáfanas de grandes dimensiones pueden ser acústicamente eficaces, además de constituir únicamente un elemento que proporcione independencia visual entre unos ocupantes y otros. Para ello es conveniente que presenten el grado de absorción mas alto posible.

Una vez más se demuestra la idoneidad de un acondicionamiento acústico integral del recinto, en este caso para incrementar las condiciones de intimidad de los puestos de trabajo en una oficina paisajista. Las mamparas separadoras deben ser altamente absorbentes y con ello ayudar a incrementar la absorción total del recinto (techos acústico, moquetas, mobiliario tapizado, etc.), ya que bajo estos supuestos de bajos tiempos de reverberación, se incrementan a su vez las pérdidas por inserción introducidas por las mamparas.

El modelo matemático propuesto presenta una buena opción en el momento de plantear el diseño de acondicionamiento acústico de estas locales.

Por último creemos que el empleo de un índice de número único, basado en el criterio de utilización del espectro de la voz, presenta una buena alternativa en el momento de comparar situaciones y calidades de diferentes mamparas.

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el Proyecto de Investigación AMB 98-1029 del Plan Nacional de I+D de la DGICYT.



## **BIBLIOGRAFÍA**

Norma ISO 10053 (1991) "Measurements of office screens sound attenuation under specific laboratory conditions".

Norma VDI 2720, hoja 2 "Schallschutz durch Absschirmung in Räumen" (1983)

T. Tarnóczy. Noise Interference with oral Communication. En Noise Pollution (Eds. A Lara y RW Stephens). John Willey & Sons (SCOPE ;24), 1986.

T.F. Embleton, Noise Vibration Control (L. Beranek (Ed)). Mc Graw Hill, New York, 1971.

5. U.J. Kurze., Shielding of noise by barriers in open – plan offices and industrial halls. Internoise 78, 617-24, 1978

